

P13-2008-69

Ю. Г. Абов¹, В. П. Алфименков, Л. Ласонь²,
Ю. Д. Мареев, Л. Б. Пикельнер, В. М. Цулаиа³, М. И. Цулаиа³,
И. М. Саламатин

УСТАНОВКА «КОЛХИДА»
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ
С ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ ЯДРАМИ

Направлено в журнал «Nuclear Instruments and Methods»

¹ИТЭФ, Москва

²Лодзинский университет, Польша

³Институт физики им. Э. Л. Андроникашвили АН Грузии, Тбилиси

Абов Ю. Г. и др.

P13-2008-69

Установка «Колхида» для экспериментальных исследований взаимодействий поляризованных нейтронов с поляризованными ядрами

В ОИЯИ на импульсном реакторе ИБР-2 [1] создана установка «Колхида», предназначенная для исследования нейтронно-оптических явлений при взаимодействии поляризованных нейтронов с поляризованными ядрами. В частности, предполагается исследование ядерной прецессии спина нейтронов в широком диапазоне энергий от тепловых до области нейтронных резонансов. Установка позволяет также исследовать свойства магнетиков с помощью поляризованных нейтронов.

Описана установка, даны ее основные параметры, а также приведен результат компьютерного моделирования эксперимента по сдвигу парамагнитного резонанса нейтронов.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Abov Yu. G. et al.

P13-2008-69

«Kolkhida» Instrument for Experimental Investigations of Interactions of Polarized Neutrons with Polarized Nuclei

In JINR at the IBR-2 pulsed reactor [1] the «Kolkhida» setup intended for studies of neutron-optics phenomena in interactions of polarized neutrons with polarized nuclei has been constructed. In particular, studies of nuclear precession of neutron spin in a wide energy range from thermal to neutron resonance energies are planned. The setup also makes it possible to investigate magnetic properties using polarized neutrons.

In the given paper we present the description of the setup, its key parameters, as well as the result of computer simulation of the experiment on neutron paramagnetic resonance shift.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

ВВЕДЕНИЕ

В работе [2], которая легла в основу возникновения новой области исследования — нейтронной оптики поляризованных сред, — теоретически было показано, что зависимость показателя преломления нейтронной волны от взаимной ориентации спинов нейтрона и ядра обуславливает поворот спина нейтронов вокруг направления поляризации мишени. Частота возникшей прецессии ω зависит от спина ядра I , плотности ядер N и разности амплитуд рассеяния нейтрона на этом ядре f^+ и f^- , соответствующих состояниям с полными моментами нейтрона и ядра $I + \frac{1}{2}$, $I - \frac{1}{2}$:

$$\omega = \frac{4\pi N\hbar}{m_n} \frac{I}{2I+1} (f^+ - f^-) P_N,$$

где m_n — масса нейтрона, P_N — степень поляризации ядер.

Ядерное поле, вызывающее прецессию спина нейтронов, принято называть эффективным магнитным полем, или псевдомангнитным полем. Величина эффективного магнитного поля

$$H_{\text{ef}} = \frac{\omega}{\gamma_n} P_N,$$

где γ_n — гиромагнитное отношение для нейтрона. В богатом водородом гидриде титана TiH_2 (плотность протонов $N = 4,9 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$) при полной поляризации ядер водорода ($P_N = 1$) величина эффективного поля $H_{\text{ef}} = 5,56 \text{ Тл}$. Соответственно, для тепловых нейтронов с энергией $E_n = 0,025 \text{ эВ}$ ($v = 2,2 \cdot 10^3 \text{ м/с}$) толщина TiH_2 -мишени, на которой произойдет полный поворот спина нейтрона,

$$\Lambda = \frac{2\pi v}{\omega} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ см}.$$

В работах [3–6] была показана реальность существования ядерной прецессии нейтронов. Для ряда ядер были измерены разности амплитуд рассеяния $f^+ - f^-$ [7]. Все исследования были проведены только для одной энергии нейтронов $E_n = 0,0048 \text{ эВ}$ ($\lambda = 4,117 \text{ \AA}$).

Рассматривая прохождение поляризованных нейтронов через поляризованную ядерную мишень, в [2] авторы показали, что если в поляризованной ядерной мишени создать переменное магнитное поле, вращающееся вокруг направления поляризации, то, по аналогии с обычным парамагнитным резонансом, возникнут переходы между энергетическими уровнями нейтрона при частоте вращающегося поля ω , равной частоте ядерной прецессии нейтронов. В постоянном магнитном поле введение поляризованной ядерной мишени приводит к сдвигу резонансной частоты из-за алгебраического сложения эффективного магнитного поля $H_{\text{эф}}$ с постоянным магнитным полем H .

Запланированные исследования по ядерной прецессии нейтронов будут проведены в интервале энергии нейтронов 0,062–2,3 эВ.

Расширение интервала энергии нейтронов до нейтронных резонансов представляет особый интерес, так как вблизи нейтронного резонанса ожидается существенное изменение характера ядерной прецессии нейтронов.

Известно, что амплитуда рассеяния нейтрона на ядре $f = f^0 + f^R$, где f^0 — амплитуда потенциального рассеяния, а f^R — амплитуда резонансного рассеяния. В случае медленных нейтронов ($\lambda \gg R$) $f^0 = R$ и

$$f^R = \frac{\lambda \Gamma_n / 2}{2\pi[(E - E_0) + i\Gamma/2]}.$$

Здесь Γ_n — нейтронная ширина; Γ — полная ширина резонанса; E — энергия нейтрона; E_0 — резонансное значение энергии нейтрона; R — радиус ядра. Стало быть:

$$f = R + \frac{\lambda \Gamma_n / 2}{2\pi[(E - E_0) + i\Gamma/2]}.$$

Вдали от нейтронных резонансов, в области тепловых энергий нейтронов, амплитуда рассеяния f не зависит от энергии нейтронов и, соответственно, частота ядерной прецессии ω не зависит от энергии нейтронов. При приближении к резонансу, когда $E \rightarrow E_0$, амплитуда f , и соответственно ω , вначале убывает с ростом энергии, достигая минимума, затем круто возрастает, достигая максимума и, наконец, убывает. Примечательно, что при переходе через резонанс амплитуда f^R меняет знак.

Установка «Колхида» готова для проведения таких исследований. Она состоит из:

- спектрометра поляризованных нейтронов;
- поляризованной ядерной мишени;
- ферромагнитного резонатора спина нейтронов;
- системы контроля и управления установкой.

В настоящей работе описаны части установки и даны ее основные параметры.

1. СПЕКТРОМЕТР ПОЛЯРИЗОВАННЫХ НЕЙТРОНОВ

Подробное описание спектрометра дано в [8]. Для поляризации нейтронов выбран метод, основанный на дифракции от определенных плоскостей намагниченных ферромагнитных монокристаллов [9]. Метод позволяет получение монохроматического пучка нейтронов высокой поляризации ($P_n \approx 1$). При создании спектрометра поляризованных нейтронов были использованы узлы установки поляризованных нейтронов, созданной в Институте физики АН Грузии [10].

1.1. Конструкция спектрометра. Спектрометр поляризованных нейтронов расположен на тангенциальном канале № 1 импульсного реактора ИБР-2. Общая схема спектрометра изображена на рис. 1. Формирование спектра нейтронов осуществляется в замедлителе реактора. Нейтроны, выходящие из замедлителя, проходят в биологической защите через канал, в который помещен первичный коллиматор 1 с площадью окна 40×40 мм. В экспериментальном зале перед поляризатором помещен соллеровский коллиматор 2 с площадью окна 50×60 мм, длиной 60 см, толщиной пластинок 1 мм из нержавеющей стали и зазором между пластинами 2 мм.

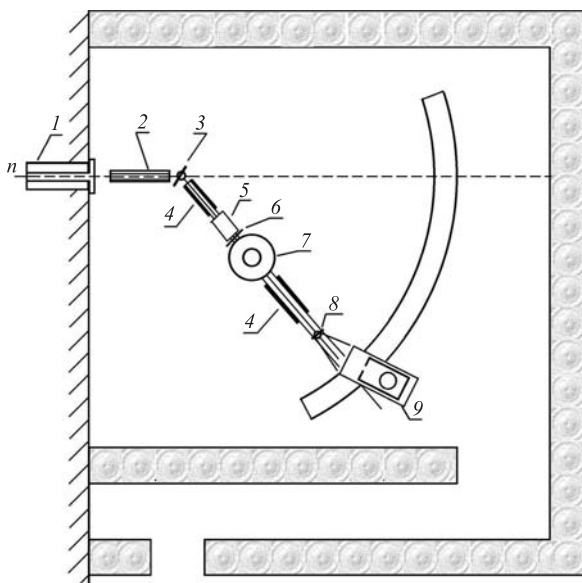


Рис. 1. Общая схема установки: 1 — первичный коллиматор; 2 — коллиматор Соллера; 3 — кристалл поляризатора; 4 — ведущие магнитные поля; 5 — флиппер Мезея; 6 — шим; 7 — криостат; 8 — кристалл анализатора; 9 — детектор

Для поляризации и анализа поляризации нейтронов используются монокристаллы $\text{Co}(92\%)\text{-Fe}(8\%)$, толщиной 3 мм, площадью соответственно 34×34 мм и 35×53 мм. В условиях дифракции Лауэ отражающие плоскости (200), обеспечивающие максимальную поляризацию, перпендикулярны поверхности кристаллов, а намагничивание происходит вдоль направления [110]. Кристаллы были выращены, обработаны и испытаны в Польше, в Институте ядерных исследований (Сверк). Для выбранных отражающих плоскостей $2d = 3,545 \text{ \AA}$.

Кристаллы поляризатора 3 и анализатора 8 установлены между полюсами электромагнитов с вертикально направленными полями напряженностью 0,4 Тл. Для сохранения поляризации нейтронов между поляризатором и анализатором установлены электромагниты ведущего поля 4 напряженностью $5 \cdot 10^{-3}$ Тл, а также шим 6 с дистанционным управлением и флиппер Мезея 5 для измерения и реверса поляризации.

Спектрометр смонтирован на металлической опоре, по которой движется массивное плечо. Ось, вокруг которой вращается плечо, совпадает с осью вращения поляризатора 3.

На плече установлены следующие узлы: магниты ведущих полей 4, флиппер Мезея 5, опора для криостата 7, анализатор с магнитом 8, платформа для детектора нейтронов 9. На установке обеспечивается вращение и измерение поворотов вокруг вертикальных осей кристаллов поляризатора и анализатора, плеча и платформы детектора. Ось вращения последней совпадает с осью вращения анализатора. Все вращения независимы друг от друга и позволяют устанавливать углы с точностью около 1 мин.

Детектором нейтронов служит счетчик СМ-17, наполненный ^3He до давления 10 атм. Вертикально расположенный счетчик помещен в домик из борированного полиэтилена, выложенный внутри кадмием для уменьшения фона. Входное на детектор окно имеет размер 10 мм по горизонтали и высоту 50 мм. Монитором служит камера деления ^{235}U RM-70 производства ИЯИ, Польша. Толщина слоя урана составляет 100 мкг/см^2 .

Пролетное расстояние от замедлителя на зоне реактора до детектора составляет 15,9 м и включает в себя следующие расстояния: замедлитель-поляризатор — 12,4 м, поляризатор-анализатор — 2,5 м, анализатор-детектор — 1,0 м. Для спектрометра построена биологическая защита из бетонных блоков. Доступ к установке осуществляется через лабиринт.

Импульсный режим работы ИБР-2 характеризуется следующими параметрами: частота импульсов — 5 с^{-1} , полуширина импульса быстрых нейтронов — 215 мкс, мощность — 1,5 МВт.

1.2. Параметры пучка нейтронов. Интенсивность и спектр первичного пучка нейтронов, падающих на поляризатор, были измерены с помощью камеры деления RM-70. Камера была закрыта кадмием, что позволяло определить фон, а затем на переднем торце камеры открывалось окно диаме-

тром 1 см. В результате были получены данные об интенсивности и спектре нейтронов в интервале энергии от 10 до 200 мэВ. Камера была установлена на пролетном расстоянии 13,5 м, и все отмеченные выше коллиматоры ограничивали пучок. Поток нейтронов в указанном интервале энергии составлял $1,0 \cdot 10^6$ н/см²с. На рис. 2 показан энергетический спектр, измеренный методом времени пролета с урановой камерой.

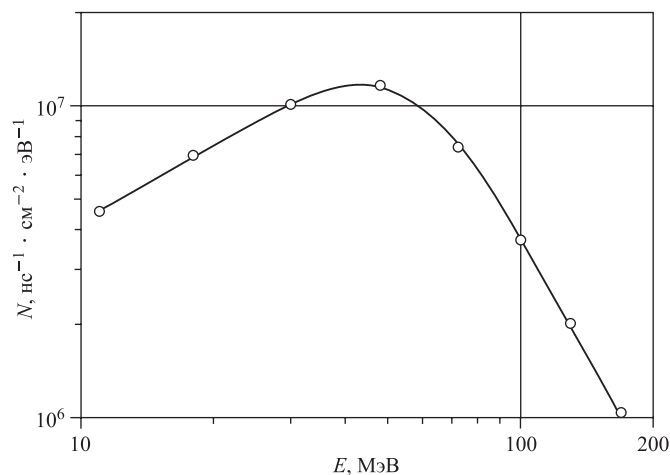


Рис. 2. Зависимость плотности потока нейтронов от энергии нейтронов, падающих на поляризатор

Согласно условию Брэгга–Вульфа

$$n\lambda = 2d \sin \theta, \quad (1)$$

где λ — длина волны нейтрона; d — межплоскостное расстояние; θ — угол скольжения Брэгга; n — порядок отражения.

Для монокристалла Со–Fe в геометрии Лауэ проводилось измерение дифракции нейтронов для различных углов θ падения нейтронов на плоскость (200) в диапазоне от 3 до 19°. В таблице приведены значения углов θ , для которых проведены измерения, и соответствующие им длины волн и энергии нейтронов. При измерении дифракции на кристалле-поляризаторе детектор устанавливался на оси плеча спектрометра так, чтобы его окно смотрело на кристалл. В результате сканирования угла θ находился максимум отраженного пучка. Скорость счета n_1 , интенсивность I_1 , учитывающая эффективность детектора и площадь отраженного пучка ($s \cong 4$ см²), приведены в таблице.

На рис. 3 показаны спектры по времени пролета, полученные при $\theta = 19^\circ$ (внизу) и $\theta = 6^\circ$ (вверху). Ширина канала временного анализатора

Таблица 1. Параметры пучка поляризованных нейтронов

Угол θ , °	19	12	6	4	3
Длина волны λ , Å	1,15	0,74	0,37	0,25	0,19
Энергия E_n , эВ	0,062	0,15	0,60	1,3	2,3
Скорость счета детектора после поляризатора n_1 , с ⁻¹	800	270	65	33	22
Интенсивность поляризованного пучка I_1 , н/с·см ²	430	200	80	60	50
Скорость счета детектора после анализа n_2 , с ⁻¹	70	23	3,1	0,6	0,2

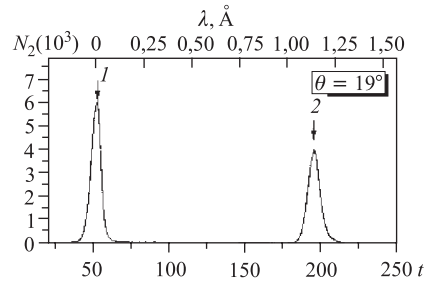
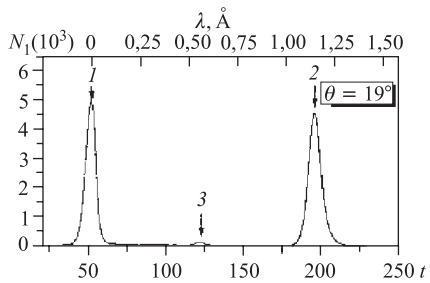
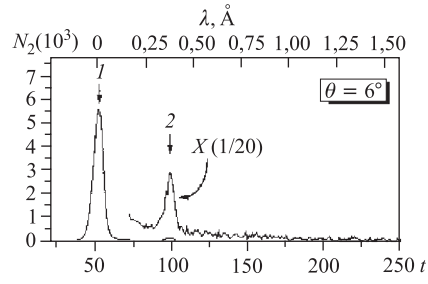
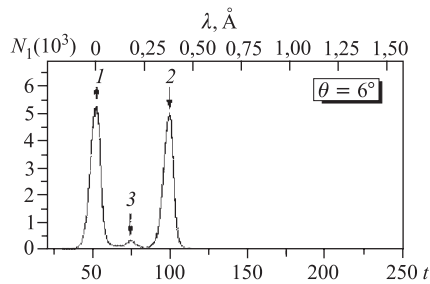


Рис. 3. Времяпролетные спектры нейтронов после поляризатора, полученные за 10 мин измерений

Рис. 4. Времяпролетные спектры нейтронов после анализатора, полученные за 10 мин измерений

32 мкс, t — номер канала. Стрелка 1 указывает положение вспышки реактора, стрелка 2 — дифракционный пик первого порядка и стрелка 3 — пик отражения второго порядка ($n = 2$ в выражении (1)). Время измерения для обоих спектров — 10 мин. При измерении спектра для $\theta = 19^\circ$ мгновенная нагрузка детектора была очень большой, поэтому дифрагированный от

кристалла-поляризатора пучок был подавлен в 10 раз с помощью фильтра. На рис. 3 приведен такой ослабленный пик. В остальных измерениях такое ослабление не требовалось.

Для получения пучка поляризованных нейтронов и анализа поляризации на кристаллы накладывалось магнитное поле и измерялась интенсивность пучка, отраженного кристаллом-анализатором. Временные спектры для тех же углов $\theta = 19$ и 6° после отражения от кристалла-анализатора показаны на рис. 4, а в таблице приведены значения n_2 — скорости счета детектора после отражения от второго кристалла.

Для измерения поляризации пучка нейтронов P_1 и поляризующей эффективности анализатора P_2 использовались методы шима и флиппера [11], а также метод двух преобразователей [12]. В качестве шима была использована пластинка трансформаторного железа толщиной 0,3 мм, полностью деполяризующая пучок. Поляризация определялась в соответствии с выражением

$$P_1 P_2 = R_{\text{ш}} - 1,$$

где $R_{\text{ш}}$ — шимовое отношение интенсивностей пучка нейтронов после анализатора без шима и с шимом.

Для реверса поляризации нами использовался флиппер Мезея, у которого эффективность переворота спина нейтронов k близка к 1. Для измерения поляризации нейтронов с флиппером используется выражение

$$P_1 P_2 = \frac{R - 1}{(2k - 1)R + 1}.$$

Здесь R — отношение интенсивностей пучка нейтронов после анализатора без флиппера и с флиппером. В результате измерений с флиппером при $k = 1$ значение $P_1 P_2$ было получено совпадающим с измерением с шимом. Это было подтверждено и при использовании шима и флиппера одновременно.

В нашей установке поляризатором и анализатором служили одинаковые монокристаллы, поэтому можно положить $P_1 = P_2$ и получить величину поляризации пучка P . Следует отметить, что величина R зависит еще и от возможных потерь поляризации на пути от поляризатора до анализатора. Именно с этим связан тот факт, что измеренная нами поляризация в разных экспериментах лежала в пределах от $P = 0,9$ до $0,98$ в зависимости от коллимации пучка и ведущих магнитных полей. Поляризация измерялась при углах θ от 19 до 3° , что соответствовало энергии нейтронов от $0,062$ до $2,3$ эВ, и при всех энергиях лежала в этих пределах. После измерения поляризации была измерена ее зависимость от магнитного поля, наложенного на поляризатор. Результаты показаны на рис. 5, откуда видно, что поле $0,4$ Тл достаточно для получения максимальной поляризации нейтронов.

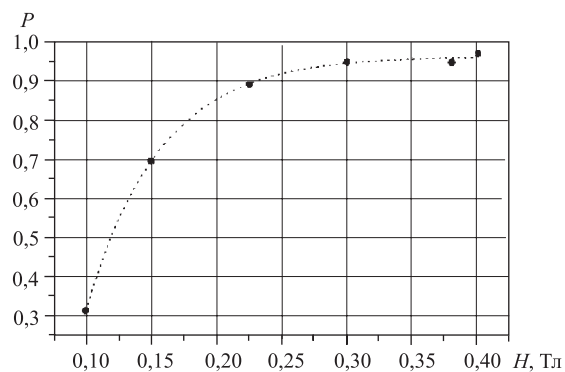


Рис. 5. Зависимость поляризации P пучка нейтронов от величины магнитного поля H на поляризаторе

2. ПОЛЯРИЗОВАННАЯ ЯДЕРНАЯ МИШЕНЬ

При поляризации ядер на установке «Колхида» будет использован метод «грубой силы» — глубокое охлаждение ядерной мишени в сильном постоянном магнитном поле. Ядерная поляризация в этом случае достигается за счет ориентационного воздействия магнитного поля на магнитные моменты ядер. При установлении теплового равновесия между системой ядерных спинов и веществом ядерной мишени величина поляризации ядер дается функцией Бриллюэна [13]

$$f_1 = \frac{2I+1}{2I} \operatorname{cth} \left(\frac{2I+1}{2I} \frac{\mu H}{kT} \right) - \frac{1}{2I} \operatorname{cth} \frac{1}{2I} \frac{\mu H}{kT},$$

где I — спин ядра; μ — его магнитный момент; T — температура мишени; k — постоянная Больцмана. В случае малых $\frac{\mu H}{kT}$ имеет место упрощенное выражение

$$f_1 \approx \frac{I+1}{3I} \frac{\mu H}{kT}.$$

В связи с малостью ядерных магнитных моментов μ для достижения заметной поляризации необходимы очень низкие температуры и очень сильные магнитные поля. Так, для гипотетического ядра со спином $I = 1$ и магнитным моментом, равным одному ядерному магнетону, при достижимых полях $H \approx 10$ Тл и температурах $T \approx 10^{-2}$ К вычисления дают $f_1 \approx 0,25$.

Для поляризованной ядерной мишени создан рефрижератор ${}^3\text{He}-{}^4\text{He}$, который состоит из:

- криостата ^4He ;
- системы циркуляции ^3He и ступени растворения ^3He в ^4He ;
- сверхпроводящего соленоида;
- системы контроля температуры;
- системы питания и управления сверхпроводящего соленоида.

2.1. Криостат с ^4He . Гелиевый криостат (рис. 6) состоит из азотной ванны 4 и двух гелиевых ванн 6 и 8. Все три ванны изготовлены из нержавеющей стали и смонтированы на центральной трубе 3 откачки ^3He . К азотной ванне 4 (объем $V = 18,5$ л) присоединен герметичный трехсекционный медный азотный экран 5, разделяющий вакуумное пространство криостата на внешнюю и внутреннюю части. Во внутренней вакуумной части криостата находится гелиевая ванна 6 (объем $V = 13$ л), работающая при 4,2 К, с гелиевым экраном 7. Внутри экрана 7 находится гелиевая ванна 8 (объем $V = 14$ л), откачиваемая по очереди вакуумными агрегатами AVR-150(1) или AVR-150(2) до температуры 1,15 К. К ванне 8 присоединен кожух сверхпроводящего соленоида 11. Легко разбираемые индиевые уплотнения позволяют замену соленоидов в зависимости от требований эксперимента. Гелиевые ванны 6 и 8 соединены между собой через криовентиль 10, регулирующий количество переливаемого жидкого гелия из ванны 6 в ванну 8. К ванне 8 через индиевое уплотнение прикреплен медный вакуумный экран 9 (вакуумный стакан ВС), являющийся вакуумной рубашкой для ступени растворения. Наружный кожух 2 криостата, изготовленный из нержавеющей стали, — разборный, трехсекционный. С целью уменьшения потери нейтронов в криостате установлены герметичные окна из пластинок нержавеющей стали толщиной 0,2 мм и двух фланцев из сплава алюминия АД, уменьшенных на пути нейтронов до толщины 0,5 мм. Предварительное охлаждение криостата осуществляется заполнением всех объемов жидким азотом, который удаляется после захолаживания всех тепловых экранов перед началом гелиевой заливки. Азотное охлаждение криостата контролируется угольными резисторами типа ТВО [14]. Для охлаждения криостата до азотной температуры требуется 80 л жидкого азота и 8 ч времени. Расход жидкого азота в рабочем режиме криостата — 0,8 л/ч. Для охлаждения криостата до гелиевой температуры требуется 40 л жидкого ^4He и 6 ч времени. Расход жидкого ^4He в стационарном режиме работы криостата — 0,8 л/ч. Для охлаждения ступени растворения до гелиевой температуры используется обменный газ He под давлением 20 Па, и требуется 15 ч времени. Перед началом конденсации смеси ^3He – ^4He обменный газ удаляется из ВС. Температура в одноградусной гелиевой ванне определяется компрессионным манометром Мак-Леода. Уровень жидкого ^4He в гелиевых ваннах определяется с использованием угольных сопротивлений Allen Bradley, собранных по схеме Лаврентьева–Чуракова [15].

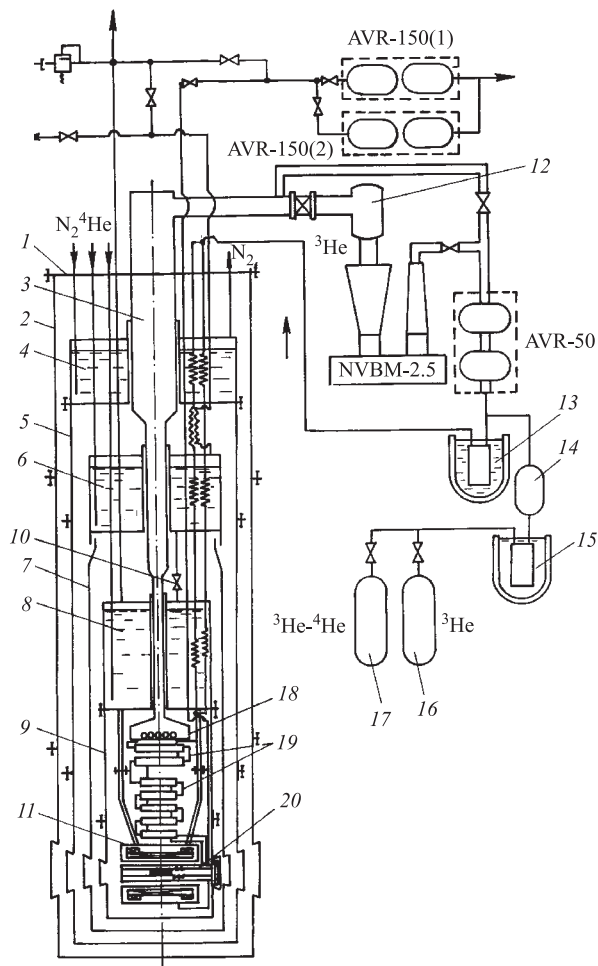


Рис. 6. Схема криостата растворения ${}^3\text{He}-{}^4\text{He}$ со сверхпроводящим соленоидом: 1 — основной фланец; 2 — вакуумный кожух; 3 — центральная труба откачки ${}^3\text{He}$; 4 — азотная ванна; 5 — азотный экран; 6 — гелиевая ванна; 7 — гелиевый экран; 8 — откачиваемая гелиевая ванна; 9 — гелиевый экран ступени растворения; 10 — крио-вентиль; 11 — сверхпроводящий соленоид; 12 — азотная ловушка бустерного насоса NVBM-2,5; 13 — масляный фильтр; 14 — насос НВГ-2; 15 — угольная ловушка; 16 — баллон для хранения ${}^3\text{He}$; 17 — баллон для хранения смеси ${}^3\text{He}-{}^4\text{He}$; 18 — ванна испарения (ВИ); 19 — теплообменники; 20 — ванна растворения (ВР)

2.2. Система циркуляции ${}^3\text{He}$ и ступень растворения ${}^3\text{He}$ в ${}^4\text{He}$. Система циркуляции ${}^3\text{He}$ собрана на базе вакуумного бустерного паромасляного насоса

НВБМ-2,5, производительностью 2500 л/с, вакуумного ротационного агрегата АВР-50 производительностью 50 л/с и герметичного механического насоса НВГ-2, включенных последовательно (рис. 6). Эта насосная группа обеспечивает скорость циркуляции ${}^3\text{He}$ $\dot{n} = 1,07 \cdot 10^{-3}$ моль/с. Для предотвращения попадания масла от насоса НВБМ-2,5 в холодную часть тракта откачки ${}^3\text{He}$ используется азотная ловушка 12, расположенная непосредственно над входным фланцем насоса НВБМ-2,5. Для очистки возвращаемого в криостат ${}^3\text{He}$ от паров продуктов разложения масла и небольшого количества воздуха, попадающего в систему из-за возможной негерметичности, служит охлажденная жидким азотом внешняя угольная ловушка 13, а также фильтры из спеченного медного порошка на линиях подачи ${}^3\text{He}$, установленные между ваннами 6 и 8. Такая система очистки предотвращает блокирование линии возврата ${}^3\text{He}$.

После окончания цикла работы смесь ${}^3\text{He}$ – ${}^4\text{He}$ для хранения закачивается в баллон 17 через угольную ловушку 15 герметизированным насосом НВГ-2.

Газообразный ${}^3\text{He}$ поступает в криостат по двум независимым линиям возврата I и II. По линиям возврата ${}^3\text{He}$ проходит через трубчатые теплообменники, расположенные на доньях азотного 4 и гелиевых 6 и 8 ванн. Диаметр медных трубок теплообменников $6 \times 0,5$, $4 \times 0,5$ и $3 \times 0,3$ мм соответственно, длина каждой трубки — 5 м. После конденсации в трубчатых теплообменниках ванны 8 ${}^3\text{He}$ проходит через дроссели D_1 и D_2 и поступает в теплообменник, помещенный на дне ванны испарения (рис. 7). Импеданс дросселя D_1 — $z = 10^9$ см⁻³, а дросселя D_2 — $z = 10^{11}$ см⁻³. При конденсации смеси используются обе линии подачи ${}^3\text{He}$, после чего линия I перекрывается.

В ванне испарения помещены: нагреватель, служащий для регулировки скорости циркуляции ${}^3\text{He}$, и термометры для измерения температуры ванны. Для подавления сверхтекучей пленки ${}^4\text{He}$ на выходе ванны испарения припаяна полированная диафрагма из нержавеющей стали.

Выходя из теплообменника ванны испарения, ${}^3\text{He}$ поступает в систему непрерывных и дискретных теплообменников (рис. 7). В рефрижераторе использованы шесть теплообменников, аналогичных описанным в [16]: непрерывные витые теплообменники 3 и 4 (трубчатый и спеченный), дискретный теплообменник 5 из спеченного медного порошка, три дискретных теплообменника 6 из спеченного серебряного порошка.

Дискретные теплообменники компактные, имеют большую площадь теплообмена и малый импеданс z . Все они собраны из деталей унифицированной конструкции: диска и двух крышек из бескислородной меди, спаянных между собой оловянным припоем. В теплообменнике 5 на обе стороны диска напечен медный порошок (размер зерна 10–40 мкм) слоем толщины 2 мм, что соответствует расчетной площади теплообмена $0,75$ м² с каждой стороны. В теплообменниках 6 использован серебряный порошок с размером зерен 0,15 мкм (чистота 99,99%). Меняя геометрические размеры и толщину

напеченного слоя порошка, можно получать теплообменники с разной площадью теплообмена. В изготовленных теплообменниках *б* расчетная площадь поверхности напеченного порошка на каждой стороне диска составляет 5; 7,5 и 10 м².

Из последнего теплообменника ³He поступает в ванну растворения *7* (рис. 7), где происходит переход атомов ³He из концентрированной фазы в раствор ³He-⁴He, т.е. происходит растворение ³He в ⁴He, сопровождаемое поглощением тепла. Под действием разности осмотических давлений ³He диффундирует через теплообменники от камеры растворения *7* к камере испарения *1*, из которой производится его откачка.

Ванна растворения помещена в рабочем объеме сверхпроводящего соленоида и с помощью текстолитовых иглок изолирована от стенок соленоида.

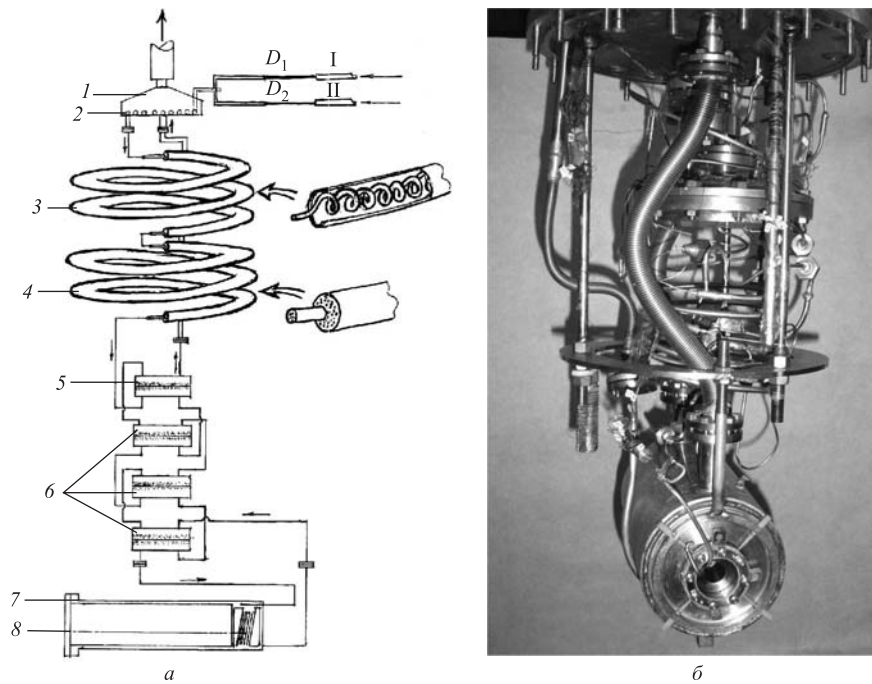


Рис. 7. Схема (а) и общий вид (б) ступени растворения ³He в ⁴He. *1* — ванна испарения (ВИ); *2* — теплообменник ванны испарения; *3* — непрерывный трубчатый теплообменник; *4* — непрерывный спеченный теплообменник; *5* — дискретный медный теплообменник; *6* — дискретные теплообменники из спеченного серебряного порошка; *7* — ванна растворения (ВР); *8* — ферромагнитный резонатор нейтронов с поляризованной ядерной мишенью

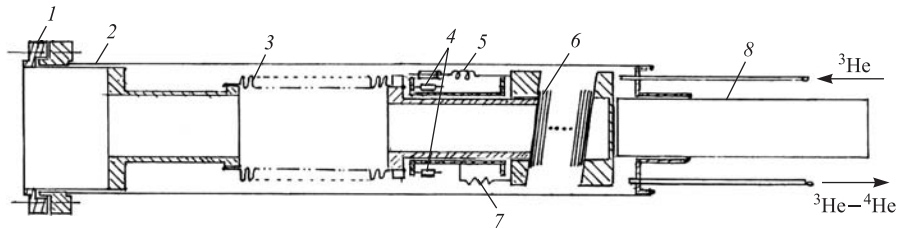


Рис. 8. Ванна растворения: 1 — заглушка; 2 — корпус; 3 — сифон; 4 — температурные датчики; 5 — катушка для контроля поляризации ядер по ЯМР; 6 — ферромагнитный резонатор нейтронов с образцом; 7 — нагреватель; 8 — центрирующая труба-заглушка

Ванна растворения (рис. 8) легко разбираема. Заглушка 1 с помощью индиевого уплотнения герметизирует внутренний объем ванны.

Благодаря сифону 3 заглушки прижимаются к образцу, обеспечивая незначительные потери интенсивности нейтронов из-за их поглощения ядрами ${}^3\text{He}$. Так как образец находится в растворе, он имеет температуру раствора (скачок Капицы незначительный, поскольку в образце нет заметного тепловыделения).

Температура в ванне растворения $T = 23$ мК при скорости циркуляции ${}^3\text{He}$ $\dot{n} = 1,07 \cdot 10^{-3}$ моль/с.

3. СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ СОЛЕНОИДЫ

Для установки созданы и испытаны два сверхпроводящих соленоида, которые через индиевые уплотнения легко можно присоединить к одноградусной гелиевой ванне 8 криостата (рис. 6). В зависимости от требования эксперимента устанавливается нужный соленоид. Они отличаются по величине напряженности магнитного поля H и однородности поля $\Delta H/H$. Соленоиды условно обозначим через I и II.

Намотка соленоида I с корректирующими катушками (рис. 9) произведена из сверхпроводящего кабеля марки СНТЕ-2 диаметром 0,51 мм.

Параметры соленоида:

- постоянная соленоида $K = 0,063$ Тл/А;
- при температуре $T = 1,18$ К критический ток $I_c = 96,5$ А, чему соответствует магнитное поле в центре соленоида $H = 6$ Тл;
- однородность магнитного поля в центре соленоида в сфере диаметром 14 мм — $\Delta H/H = 2,4 \cdot 10^{-4}$.

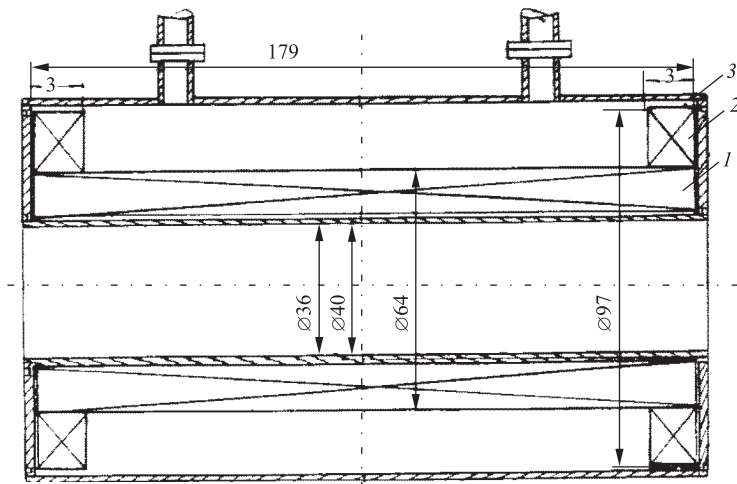


Рис. 9. Схема сверхпроводящего соленоида I: 1 — основная катушка; 2 — корректирующие катушки; 3 — корпус

Намотка соленоида II с корректирующими катушками произведена из сверхпроводящей проволоки марки HT-50 диаметром 0,7 мм. Магнитное поле соленоида II сильно неоднородное. Постоянная соленоида $K = 0,044$ Тл/А. При температуре $T = 4,2$ К критический ток $I_c = 151,6$ А и, соответственно, напряженность магнитного поля $H = 6,6$ Тл. Внутренний диаметр соленоида — 36 мм.

4. ФЕРРОМАГНИТНЫЙ РЕЗОНАТОР СПИНА НЕЙТРОНОВ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ЯДЕРНОЙ ПРЕЦЕССИИ НЕЙТРОНОВ

Для экспериментального исследования ядерной прецессии нейтронов предполагается использовать ферромагнитный резонатор спина нейтронов. Как было показано в работах [17, 18], нейтрон, проходя через пространственно-периодическое импульсное магнитное поле и перпендикулярное к нему постоянное магнитное поле, при определенных значениях скорости нейтрона и шага пространственно-периодического поля, переворачивает свой спин. Резонатор называют ферромагнитным, если пространственно-периодическое импульсное магнитное поле создается намагниченными до насыщения пленками ферромагнетика. Теория такого резонатора дана в [19]. С учетом разрешающей способности спектрометра эффективность переворота спина такого резонатора нейтронов [20]:

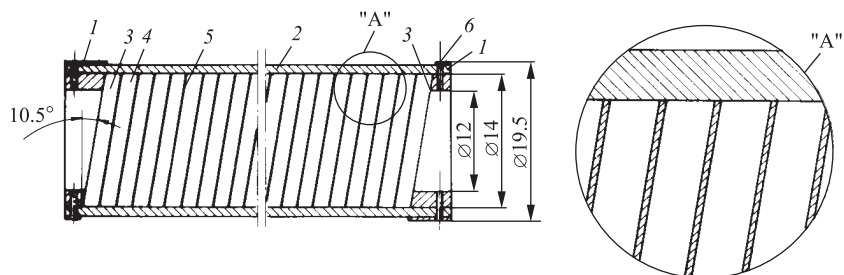


Рис. 10. Конструкция ферромагнитного резонатора нейтронов: 1 — заслонки; 2 — корпус; 3 — пластинки из нержавеющей стали; 4 — алюминиевые прокладки; 5 — фольги пермаллоя; 6 — фиксирующие болты

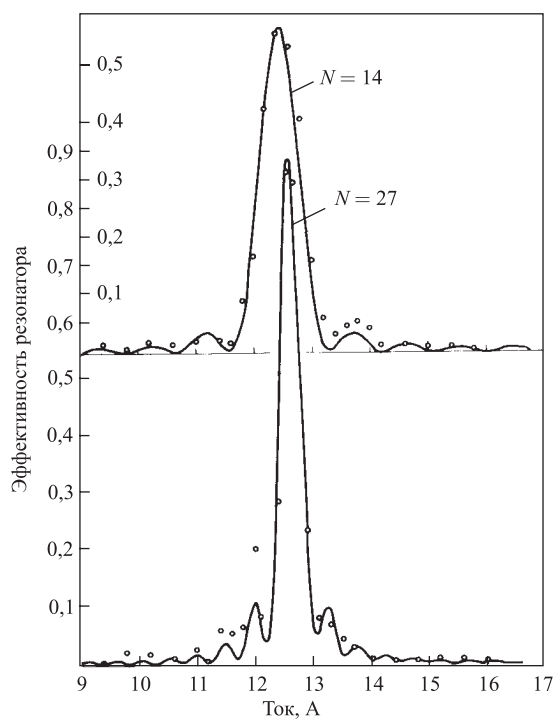


Рис. 11. Зависимость $K_{\text{эф}}$ ферромагнитного резонатора от силы тока в сверхпроводящем соленоиде при числе секций $N = 14$ и 27 . Постоянная соленоида $K = 0,044$ Тл/А. Сплошная линия — расчет, кружки — результаты эксперимента

$$K_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{A_{11}}{\pi}} \int K_r(\delta) e^{-\delta^2} d\delta,$$

где

$$\delta = \left(\frac{\Delta v}{v} \right) \text{tg} \vartheta_B.$$

Здесь v — скорость нейтронов; ϑ_B — угол Брэгга для поляризатора и анализатора спектрометра; K_r — эффективность спектрометра без учета разрешающей способности спектрометра; A — коэффициент, который определяется мозаичностью кристаллов поляризатора и анализатора и коллимацией пучка нейтронов. Такой резонатор был рассчитан, создан и испытан [20] для нейтронов длиной волны $\lambda = 1,11 \text{ \AA}$. Конструкция резонатора показана на рис. 10. В резонаторе пространственно-периодическое магнитное поле создавалось намагниченными до насыщения пленками пермаллоя марки 50НП-И толщиной 1,5 мкм. Секции резонатора (одну секцию резонатора формируют фольга пермаллоя 5 и алюминиевая прокладка 4 толщиной 0,2 мм) набираются между двумя пластинками 3 из нержавеющей стали и болтами стягиваются между заслонками 1.

На рис. 11 представлена зависимость эффективности переворота резонатора от силы тока в сверхпроводящем соленоиде (постоянная соленоида $K = 0,044 \text{ Тл/А}$). В эксперименте по ядерной прецессии нейтронов прокладки из алюминия будут заменены образцами ядерной мишени.

Проведено компьютерное моделирование эксперимента для случая $H_{\text{ef}} = 0,003 \text{ Тл}$.

Результаты даны на рис. 12.

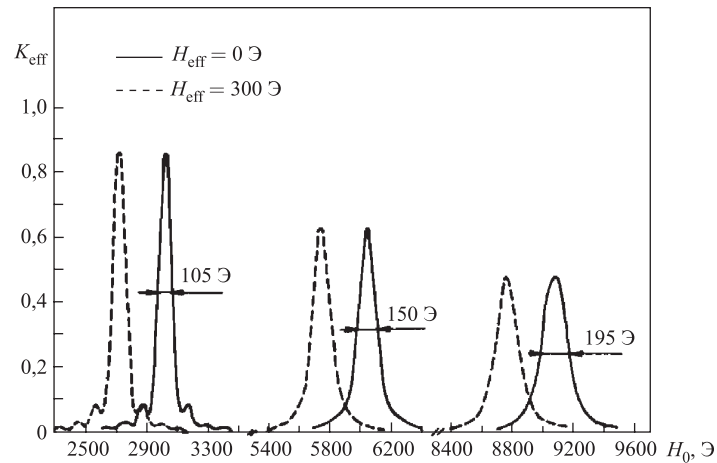


Рис. 12. Сдвиг парамагнитного резонанса нейтронов, вызванный эффективным магнитным полем H_{eff} . K_{eff} — эффективность резонатора нейтронов

5. СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКИ

5.1. Электронное оборудование установки. Блок-схема электроники установки «Колхида» представлена на рис. 14. Программно-управляемый временной кодировщик ВКП4 в сочетании с блоком памяти ОЗУ16К образует тракт регистрации данных. Таких трактов в системе два для обеспечения надежности, на оба подается сигнал детектора СД. Блок КС014 (4 счетчика) используется для регистрации счета мониторов и синхроимпульсов (СИ) реактора. Время экспозиции спектров определяется двумя способами: 1) по часам ЭВМ; 2) по количеству СИ реактора. Для подсчета СИ введен также блок Старт/Стоп. По исчерпанию предустановленного значения в этом счетчике он вырабатывает сигнал запрета регистрации, а также вырабатывает запрос прерывания (LAM), на который могут реагировать программы. Сигнал запрета регистрации подведен к кодировщикам и блоку КС014. Блок ВыхРегистр может управлять 16 реле. В системе используются два реле: 1) для управления шимом и 2) включения/выключения спин-флиппера. Для управления двигателями, изменяющими положение узлов установки, используется интеллектуальный контроллер БУШД на базе микропроцессора и группа интерфейсных блоков КФПК, по одному для каждого двигателя (или другого исполняющего устройства). Блок ИСТ управляет стабилизированным источником тока. Блок КК009 — контроллер крейта.

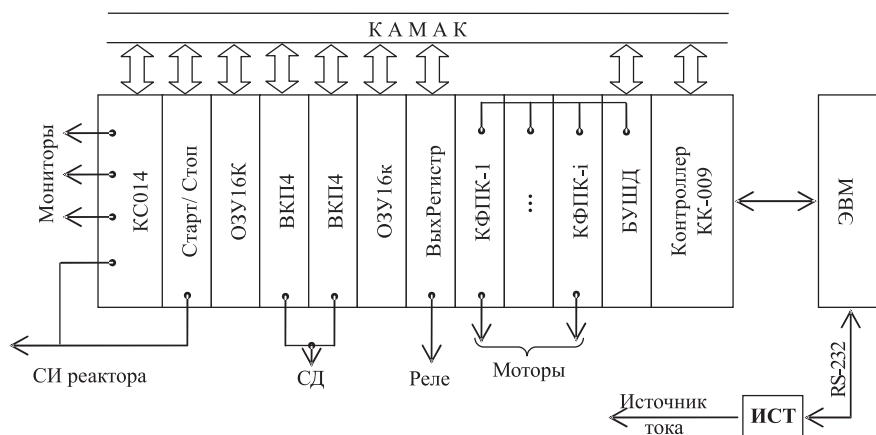


Рис. 13. Блок-схема электроники установки «Колхида»

5.2. Программное обеспечение. Разработаны две группы программ, которые условно можно назвать «Драйверный слой» и «Управление экспериментом». Программы драйверного слоя загружаются в ЭВМ, к которой подключено оборудование в стандарте КАМАК. Программы управления экспериментом могут работать на этой же ЭВМ либо на удаленной.

5.2.1. Драйверный слой. Программы, работающие непосредственно с оборудованием КАМАК, написаны под ОС DOS. Такой выбор ОС обусловлен следующими соображениями:

- работа с оборудованием проще программируется под ОС DOS;
- возможно использовать готовую удобную методику программирования оборудования КАМАК [21], обеспечивающую максимальную скорость выполнения КАМАК-команд.

Этот слой программ включает:

- драйверы и тесты всех блоков КАМАК;
- программы проверки подсистем: 1) регистрации данных; 2) управления двигателями (ориентацией кристалла-поляризатора, кристалла-анализатора, детектора и др.); 3) управления положением шима; 4) управления включением/выключением спин-флиппера;
- программы юстировки осей вращения установки «Колхида». Таких осей 4: кристалл-поляризатор, платформа, кристалл-анализатор, детектор;
- служебная программа управления функциями драйверного слоя.

Полный набор тестов и программ проверки подсистем позволяет быстро выполнить диагностику и установить причину возможного отказа. Наличие горячего резерва наиболее важного оборудования (подсистемы регистрации) повышает надежность системы.

Программы юстировки осей спектрометра позволяют установить положение точки начала отсчета углов поворота (нуля) и положения рефлексов кристаллов. Для визуального контроля качества регистрируемых данных при юстировке и простых измерениях может быть вызвана программа визуализации спектров. Результаты процесса сканирования оси при поиске рефлексов также могут быть визуализированы.

Для управления этим слоем программ на языке Pascal разработана служебная диалоговая программа. Данная программа позволяет описать используемую конфигурацию оборудования КАМАК (состав блоков и их позиции в крейте, временные диаграммы ВКП4 и др.), вызвать любой тест, проверяющую программу, программу юстировки или регистрации и визуализации данных.

5.2.2. Программа управления экспериментом. Программа управления экспериментом написана в среде Delphi под ОС Windows. Отдельные страницы интерфейса предназначены для выполнения различных работ, в числе которых:

- измерения спектров нейтронов при различных напряжениях магнитного поля сверхпроводящего магнита поляризованной ядерной мишени (при различных токах источника электропитания магнита);
- измерения при двух положениях шима: в пучке/вне пучка;
- измерения при двух состояниях флиппера: включен/выключен;
- проверка оборудования установки и др.

Исследования ядерной прецессии спина нейтронов будут проводиться при различных токах сверхпроводящего соленоида. В этих измерениях при заданных прочих условиях сканируется с заданным шагом диапазон токов, на каждом шаге вычисляется сумма отсчетов в заданном участке спектра. При обнаружении искомой структуры на графике ток–сумма шаг сканирования этого интервала может быть уменьшен. Предварительные оценки показывают, что для обнаружения эффекта потребуется продолжительная экспозиция файлов в каждой точке, поэтому для контроля стабильности работы оборудования полная экспозиция данных разделяется на отдельные (равные) интервалы. Программа регистрирует файлы этих отдельных замеров, контролирует стабильность работы регистрирующего оборудования и представляет результаты контроля в протоколе.

При включении системы после несанкционированного прекращения работы (сбой оборудования, временная потеря питания и др.) программа может повторить незавершенный замер и продолжить работу.

Для целей комплексной проверки и настройки работы системы в режиме работы с источником тока введена вспомогательная страница «Single point», позволяющая выполнить регистрацию данных в одной точке (т. е. при одном значении тока).

Страница «Cd or Solenoid» позволяет выполнять измерения при двух положениях шима (в пучке/вне пучка) или при двух состояниях флиппера (включен/выключен). Как и в выше описанном режиме работы, для контроля стабильности работы оборудования полная экспозиция данных разделяется на интервалы, программа регистрирует файлы отдельных чередующихся замеров, представляет результаты контроля в протоколе. Помимо этого, составляются списки файлов для обоих состояний и предоставлена возможность повторить контроль данных при других критериях корректности после завершения эксперимента.

5.3. Система контроля температуры, питания и управления сверхпроводящего соленоида. Для контроля температуры в ВР установлены температурные датчики:

- градуированный термометр из оксида рутения RX-202A-AA фирмы Lase Shore;
- градуированное угольное сопротивление Speer $R = 100 \text{ Ом}$;

- неградуированный термометр фирмы Mitsubhiti.

В ВР установлен также нагреватель для быстрого удаления раствора и для определения холодопроизводительности рефрижератора.

На выходе теплообменников установлено градуированное угольное сопротивление Speer $R = 100\Omega$. В ВИ установлены неградуированный резистор Allen Bradley и градуированный угольный резистор марки 28Ю-42.

Для контроля температуры создан многоканальный измеритель сопротивлений низкотемпературных терморезисторов. Измеритель выполнен в стандарте КАМАК и управляется персональным компьютером.

Технические характеристики измерителя:

- | | |
|--|----------------------|
| • Число измеряемых каналов | 12 |
| • Рабочий диапазон измеряемых сопротивлений, Ом | $10^2 - 10^6$ |
| • Диапазон измерительных токов, А | $10^{-7} - 10^{-10}$ |
| • Погрешность измерения сопротивления в рабочем диапазоне при подводимой мощности: | |
| 10^{-10} Вт | 2 % |
| 10^{-12} Вт | 3 % |
| 10^{-14} Вт | 5 % |
| • Время измерения по одному каналу, мс | 60 |

Для питания сверхпроводящих соленоидов создан стабилизированный источник постоянного тока АИСТ-110, который управляется через последовательный порт персонального компьютера. Встроенный в источник модуль управления позволяет изменять выходной ток источника в диапазоне 0–110 А с точностью 5 мА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана установка «Колхида», позволяющая проводить исследования при взаимодействии поляризованных и неполяризованных нейтронов с поляризованными ядрами. Она также позволяет исследовать свойства магнетиков с помощью поляризованных нейтронов.

Авторы выражают благодарность В. Л. Аксенову за поддержку и постоянное внимание к работе. Мы благодарим Б. А. Родионова, С. И. Неговелова, Т. Л. Пикельнер, А. Ф. Прудкогляда, оказавших большую помощь в создании установки.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта INTAS Ref. No.:00-00043 и средствами направления «Нейтронные исследования» ГНТП «Актуальные направления в физике конденсированных сред».

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев В. Д., Блохинцев Д. И., Булкин Ю. М. и др. // ПТЭ. 1977. Т. 5. С. 17.
2. Барышевский В. Г., Подгорецкий М. И. // ЖЭТФ. 1964. Т. 47, No. 3(9). С. 1050.
3. Abragam A., Vaccella G. L., Glättli H. et al. // C.R. Acad. Sci., Paris, Ser. B. 1972. V. 274. P. 423.
4. Forte M. // Nuovo Cimento. A. 1973. V. 18, No. 4. P. 726.
5. Abragam A., Vaccella G. L., Glättli H. et al. // Phys. Rev. Lett. 1973. V. 31, T. 12. P. 776.
6. Glättli H. // II школа по нейтронной физике, Алушта-74; Дубна, 1974. С. 403.
7. Roubeau P. Abragam A., Vaccella G. L., Glättli H. et al. // Phys. Rev. Lett. 1974. V. 33, No. 2. P. 102.
8. Абов Ю. Г., Алфименков В. П., Ласонь Л. и др. // ПТЭ. 2000. Т. 3. С. 9.
9. Тарасов Л. В., Гуревич И. И. Физика нейтронов низких энергий. М.: Наука, 1965.
10. Tsulaja M. I., Gabelja M. S., Blinowski K. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1981. V. 185. P. 497.
11. Абов Ю. Г., Крупчицкий П. А., Гулько А. Д. Поляризованные медленные нейтроны. М.: Атомиздат, 1966.
12. Цулая М. И., Габелия М. С., Джамаспшвили С. И. // ПТЭ. 1991. Т. 1. С. 69.
13. Хуцишвили Г. Р. // УФН. 1954. Т. 53(3). С. 381–412.
14. Дацков В. И. Препринт ОИЯИ 8-80-213. Дубна, 1980.
15. Лаврентьев В. Н., Чураков В. В. // ПТЭ. 1984. Т. 5. С. 196.
16. Гуревич Г. М., Грибов А. С. и др. // ПТЭ. 1998. Т. 6. С. 46.
17. Корнилов С. Г. // ЖЭТФ. 1956. Т. 31,3(9). С. 512.
18. Драбкин Г. М. // ЖЭТФ. 1962. Т. 43, No. 3. С. 1107.
19. Драбкин Г. М., Рубан В. А., Сбитнев В. И. // ЖТФ. 1972. Т. 42, No. 5. С. 1076.
20. Chełmicki L., Dobrzyn'ski, Tsulaja M. I. // Nucleonika, 1980. V. 25, No. 6. P. 879.
21. Балука Г., Саламатин И. М. Препринт ОИЯИ 10-84-573. Дубна, 1984.

Получено 20 мая 2008 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 15.07.2008.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,9. Тираж 315 экз. Заказ № 56235.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/